

## 原子力プラントシステムおよびその運転方法

### 発明の背景

#### 発明の技術分野

本発明は、原子炉から蒸気・タービン系への放射能の移行を低減する技術に関する。

#### 関連技術の説明

原子力プラントにおいては、運転時および定期検査時の被曝を低減することが重要である。これまでに、主としてC0-60の炉水放射能濃度の低減や原子炉水系統への放射能の移行低減の対策として、種々の材料対策、水質制御対策、浄化装置の改善がなされてきている。しかし、主蒸気・タービン系統への放射能移行低減の対策についてはこれまでにない。

以下に、図1および図2を参照して現行の原子力プラントシステムにおける蒸気系への放射能移行のメカニズムとその寄与率を示し、解決すべき課題について説明する。

図1に示すように、現状では、原子炉压力容器（以下「压力容器」という）9内の炉心部10で生成された放射性物質は、一部は炉水浄化装置5で除去される。一方、生成された放射性物質の大部分は、飽和水が循環している压力容器9内の機器、压力容器9の内壁および炉水浄化装置5の上流側配管に付着する。また、極く一部であるが、原子炉水に溶解しているイオンまたは分子状の放射性物質は、蒸気分圧を持っているため蒸気とともに揮発する。

一方、液滴は気水分離器4およびドライヤー3で大半が除去されるが、極く一部（0.1%以下）は飛沫としてタービン系の入口にある蒸気バルブ1を通過して蒸気タービン系などを汚染する。また、最近では原子炉停止時に早く温度を下げる運転がなされており、この時には放射能レベルの高い炉水浄化装置5の出口水がヘッドスプレーノズル6から噴霧されるため、飛散した液滴に含まれている放射能が蒸気系に移行することになる。

次に、図2を参照して、蒸気系への液滴の移行に密接に関連したドライヤー（蒸気乾燥器）3での液滴挙動について述べる。図1に示す気水分離器4を通過した液滴を含む蒸気（湿り度10%以下）は、蒸気侵入穴20で分散され、

波板 2 2 の収められた部位を通過して、圧力容器 9 の上部を通過して蒸気系配管 1 1 へと導かれる。質量の大きい液滴は、波板構造に沿った蒸気の流れとともに方向を変えようとするが、慣性力により波板 2 2 に衝突する際に波板 2 2 に捕捉され、波板 2 2 壁を伝って底部のドレンパン 2 4 に集められて、ドレン管 2 5 により炉水に戻される。

しかし、波板 2 2 間の隙間部での流速が速い（滞在時間が短い）と、微細な粒径の液滴は衝突せずに通過する。また、流速が速いと、波板 2 2 に衝突して付着した液滴や放射性物質が、蒸気流れによる剪断力によって剥離して蒸気系へと運ばれてしまう。

従って、実プラントでの蒸気系への放射能移行率は、水中に溶解している放射性物質の気液分配率から計算される値より高い。蒸気系への放射能移行要因をまとめると下記の 3 つの事象、すなわち、(i) 炉水に溶解している放射能（溶解放射能）の蒸発による蒸気系への移行、(ii) 液滴がドライヤーなどの機器・装置に一旦衝突した後に液滴として再離反するか又は乾燥後付着した放射能が剥離して蒸気系へ移行、(iii) ヘッドスプレーにより飛散した液滴等の蒸気系へ移行、に集約され、それぞれの寄与率は 1 : 3 : 1 である。

ところで、最近、経済性の観点から、機器のサイズを変更することなく高出力化や高温・高圧化を計りたいなどの新しいニーズも生じつつある。しかし、上記の事項を勘案すれば、原子炉の高出力化を行った場合には気水分離器やドライヤーの液滴性能が不十分となり、結果として蒸気系への放射能の移行が増大することが容易に推測できる。なお、高温・高圧化をさらにおしすすめた場合には、超臨界状態になる。この場合、超臨界水中の粒子状または溶解した放射能は、適当な分離・除去装置を設けない限り、100% 蒸気系へ移行してしまうことになる。このため、超臨界炉では高温水浄化装置（本明細書では「高温で使用可能な、水または蒸気中の放射能を分離・除去する装置」を意味する用語として用いる。）は最も重要な機器の一つとなってくる。

これまでも、熱ロスを伴わない高温水浄化装置が各種提案されてきている。しかし、いずれの装置も、腐食生成物の捕捉やタービン系に使用する有機物質の汚染による差圧上昇、高温水の水化学的不安定性による過剰な過剰剤やフィルタ



て、放射能を含まない水または放射能の少ない復水浄化装置出口ないし復水貯蔵タンク貯蔵水を使用することを特徴とする原子力プラントの運転方法を提供する。

### 図面の簡単な説明

図 1 は、原子炉圧力容器まわりのシステム概略図：

図 2 は、荷電粒子の電磁場での運動方向の概念図；

図3は、第1の実施形態に係るドライヤーの構成を概略的に示す図；

図 4 A 及び図 4 B は、高温水浄化装置に用いる中空膜管の構成を概略的に示す概念図であって、図 4 A は全体を示す斜視図、図 4 B は図 4 A における領域 IVB を拡大して示す図；

図 5 A は第 2 の実施形態に係る高温水浄化装置の構成を概略的に示す縦断面図、図 5 B は中空膜管の作用を説明するため図 5 A の領域 VB を拡大して示す概略図；

図6は、高温水浄化装置の他の実施例を示す概略断面図；そして

図7は、第3の実施形態に係る高温水浄化装置の概略断面、である。

### 好適な実施形態の説明

以下に図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。

〔第 1 の実施形態〕

既に建設して運転しているプラントでは、新たに放射性物質を分離・除去する装置を設置する場所を設けることはスペースの問題や経済的な理由などにより難しい。しかし、原子炉圧力容器内 9 に収納されている気水分離器 4 やドライヤー 3 などの改善や交換による高性能化によって蒸気系への放射能移行の低減を図ることは可能である。以下、放射能移行寄与率の大きい液滴がドライヤー 3 などの機器・装置に一旦衝突した後、液滴として離反または乾燥後付着した放射能が剥離して蒸気系へ移行する減少を防止する手法について説明する。

以下に、図2を参照して、ドライヤー3の波板22の表面に、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、フェライト等の物質を形成することによりドライヤー3を改良した実施

形態について説明する。なお、この改良は、ドライヤー3の波板22の表面に限らず、他の部材の表面にも施すことも可能である。

TiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>およびフェライトは、高温水または蒸気中で化学的に安定であり、下記の機能が長期間にわたって持続するという利点がある。

TiO<sub>2</sub>は、イオン交換性能および／または超親水性を示す物質である。また、特に、TiO<sub>2</sub>は高温イオン交換体として使用される物質であり、バインダーとしてのSiO<sub>2</sub>とともに使用すると超親水性を示すことは良く知られている。超親水性を持った物質を設けることにより、付着した液滴は壁面に広がるため蒸気の流れからの剪断力を受けにくくなり再剥離しにくくなる。また、液滴に含まれていた腐食生成物が、乾燥後平坦化して表面に強固に付着するという効果も得られる。

また、TiO<sub>2</sub>はイオン交換性能も具備しているため、粒子状の放射性物質も捕捉することができる。このため、放射性物質はバインダー物質になるイオン状の腐食生成物となって波板22の表面に強固に付着する。この効果により、付着放射能の剥離を防止できる。蒸気系に移行する主な放射性物質は、Co-60／Co-58およびMn-54等の炉水中においてイオン状の放射性物質であるため、TiO<sub>2</sub>の適用は効果的である。

なお、イオン交換性能はフェライトおよびZrO<sub>2</sub>も具備している。

また、TiO<sub>2</sub>およびZrO<sub>2</sub>は、放射線（例えばN-16が発する強いガンマ線）および放射線から生成されたチェレンコフ光を受けることによって、光触媒作用により有機物を分解する作用がある。タービン系統には油類などの有機物が使われているため、有機物分解作用を有する物質を用いることにより、洗浄等の作業等を行うことなく前述した親水性およびイオン交換性を維持することができ、機器メンテナンスの必要性を大幅に低減することができる。

TiO<sub>2</sub>は鋼の添加成分として使用されている物質であり、腐食反応により表面に酸化物として形成されやすい物質であり、10<sup>-4</sup>Mpa程度の微量空気を含んだ環境下において高温酸化することにより材料の表面に形成することができる。従って、化学成分を適宜調整した材料（例えばTiを含む鋼板）から波板22を形成し、これを高温酸化させることにより表面にTiO<sub>2</sub>が形成され

00001733-033004  
T00000-00000000

た波板22を得ることができる。なお、 $TiO_2$ を $SiO_2$ バインダとともに形成する場合には、例えばTiおよびSiを含む銅板から波板22を形成し、これを高温酸化させればよい。なお、 $TiO_2$ および $SiO_2$ を極細の繊維状に形成し、上記波板22の表面を覆う層を形成してもよい。この場合、繊維同士の間には毛細管現象により水がしみ込むため、蒸気の流れからの剪断力を受けにくくなり再剥離しにくくなる。また、液滴に含まれていた腐食生成物が、乾燥後、繊維間に捕捉され続けるという利点もある。

また、波板22の表面に、 $TiO_2$ を形成しやすい物質、例えばTiまたはTi合金の層を形成し、Tiを高温酸化させることにより波板22の表面に $TiO_2$ を形成することも可能である。TiまたはTi合金層の形成は、公知の物理的方法（例えば溶射）や化学的方法により可能である。なお、 $TiO_2$ を $SiO_2$ バインダとともに形成する場合には、例えば $TiO_2$ および $SiO_2$ を形成しやすい金属を物理的方法や化学的方法により波板22表面に付与して、これを高温酸化させればよい。

この方法は、 $ZrO_2$ を形成する場合にも用いることができる。すなわち $ZrO_2$ を形成する場合には、物理的方法または化学的方法により波板22の表面にZrまたはZr合金の層を形成し、Zrを高温酸化させればよい。

なお、フェライトは、ステンレス鋼などの鉄基合金やインコネルなどのNi基合金を高温酸化させることにより形成することができる。

なお、 $TiO_2$ 、 $ZrO_2$ およびフェライトは、既に運転されているプラントで所定時間使用後の波板22にも適用することができ、上記と同様の効果を得ることができる。この場合には、ジェット洗浄などにより波板22表面に生成され比較的ルースに付着したn型半導体酸化物を除去し、タイトに付着したp型酸化膜を露出させる。しかる後、遠隔操作が可能なノズルによる吹きつけや溶射などの手法により $TiO_2$ 、 $ZrO_2$ およびフェライト等を付着させればよい。

なお、上記で説明した捕捉率向上方法は、一度捕捉した液滴または放射性物質を逃がさないことにより捕捉効率を向上させるものである。次に、液滴または放射性物質を積極的に捕捉することにより捕捉効率を向上させる方法につい

て説明する。

極微小の水滴やイオンや分子などの帯電物質は、微細であり放射能を帯びているため帯電しやすい。荷電粒子は、図3に示すような電場E内にある場合に、または図3に示すような磁場H内にある場合、電場Eおよび磁場Hにそれぞれ直交する方向に力Fを受けるため、これを利用することにより波板22に荷電粒子を移動させることができる。

なお、電場を利用した放射性物質の捕集は放射線モニターにも応用され、電場を利用した微細粉体の捕集については化学工学装置で広く利用されている技術である。また、磁場を利用して粒子を移動させる技術は荷電粒子の加速器に用いられている。

図2に示すドライヤー3の場合、具体的には、波板22が取り付けられる固定棒23を絶縁体により形成し、波板22をドライヤー容器から絶縁するとともに各波板22間に電圧を付与することにより荷電粒子を集塵することが可能となる。

このような機能を実現するためには、電源が必要である。電源としては外部電源を利用することもできるが、以下のような構成とすることにより、外部電源を省略することも可能となる。すなわち、例えば、前述したように所定時間使用した波板22表面ジェット洗浄などにより波板22表面に生成され比較的ルースに付着したn型半導体酸化物を除去し、タイトに付着したp型酸化膜を露出させて、その後 $TiO_2$ または $ZrO_2$ を付着させる。ここで $TiO_2$ および $ZrO_2$ はn型半導体であるため、この半導体領域への放射能の直接入射または放射能より生成されたチェレンコフ光により励起され、電子とホールを分離されて発電された電気を使用できる。すなわち、積層されたp型酸化膜とn型半導体酸化物により構成された光電池により発電された電力を電源として利用することができる。

なお、上記の説明においては、p型酸化膜が実機運転時の高温酸化により形成されたものとしているが、p型酸化膜は新品時に人為的に形成したものであってもよい。

また、捕捉効率を向上させる手法としては、上述した物理的および化学的手

法だけでなく、波板 22 の幾何学的形状を変更する手法も考えられる。

現行設計では、ドライヤー 3 の波板 22 への単水分子の衝突確率は 5 % 程度と小さい。流れ条件が現行と同一であれば、単純に 20 倍の接液面積にすれば、ほぼ 100 % 衝突させることができるわけである。図 2 の波板 22 の厚みを機械強度を考え適正值に薄くすることにより接液面積を増大させることができる。

この手法は、混相流に含まれる極微小の水滴やイオンや分子など物質のうち、の波板 22 表面への移行速度が小さい物質の分離・除去性能を向上させる上で有効である。この場合、一般に材料の接液面積を大きくすると差圧の上昇が避けられないという問題はあるものの、水または蒸気中の放射性物質の衝突確率を増加させ捕捉効率を高めることが可能となる。

なお、本実施形態においてはドライヤー 3 の波板 22 の改良を例にとって説明したが、本実施形態に係る技術は、原子炉圧力容器の内壁自体、または原子炉容器の内部もしくは外部に設置される水、蒸気、そして水および蒸気を含む混相流が通過する他の機器にも適用することが可能である。すなわちこのような機器等の水または蒸気と接する面に  $TiO_2$ 、 $ZrO_2$  またはフェライト等の物質を付与することにより、同等またはこれに準じた効果を得ることができる。

## 〔第 2 の実施形態〕

次に、第 2 の実施形態について説明する。第 2 の実施形態は、高温で使用可能なフィルターすなわち高温フィルターを具備した高温水浄化装置の改良に関するものである。

図 5 A は、本発明による高温水浄化装置の構成を概略的に示す断面図である。図 5 A に示す高温水浄化装置は、液体状態の高温水を浄化する用途に適している（蒸気に適用できないわけではない）。図 5 A に示すように、高温水浄化装置 40 は、高温フィルターとして複数の中空膜管 30 を有している。

この中空膜管 30 は、図 4 A 及び図 4 B に示すように、その外層として、微細な粒子を捕捉する差圧のたやすい微細な孔のあいた薄いスキン層 31 を持



ち、その内層としてスキン層 3 1 を保持する基質層 3 2 を持った 2 層構造となっている。基質層 3 2 は、スキン層 3 1 の孔よりも大きな多数の微細な空隙を有している。基質層 3 2 は円筒形状を有しており、従って中央部は空洞 3 3 となっている。

スキン層 3 1 の細孔の大きさは  $0.45 \mu\text{m}$  以下であることが望ましい。炉水中の粒子状の放射性物質および腐食生成物の大きさは、そのほとんどが  $0.45 \mu\text{m}$  以上であり、スキン層 3 1 の細孔の大きさがこれ以下であれば孔を閉塞することなく表面ろ過ができるからである。

なお、図 4 B に示す中空膜管 3 0 は 2 層構造であるが、これに限定されるものではなく、多層構造としてもよい。

スキン層 3 1 および基質層 3 2 は、高温水が存在する環境下で安定な、金属（純金属またはその合金）、複合材料およびセラミックス等からなる多孔質体により形成することができる。具体的には、フェライト酸化物、 $\text{TiO}_2$  および  $\text{ZrO}_2$  等の酸化物により形成することができる。またはこれらの酸化物を生成する金属、またはステンレス鋼などの Fe 基合金、Fe を含む Ni 基合金、Ti 合金、Zr alloy 等の合金材料を用いることができる。これらの材料は加工性が高いので、複雑な中空膜形状で適切な中空膜構造を持つフィルターを製造できる。

なお、基質部 3 2 は、粒状、板状、リボン状、繊維状形状材料による隙間、網目、ハニカムあるいはモノリスなどの構造を持つ多孔質体に形成することが好ましい。

微細な粒子がスキン層 3 1 によりろ過され、かつスキン層 3 1 の孔がこの微細粒子により塞がれないように、スキン層 3 1 の孔の径はスキン層 3 1 の捕捉対象となる微細粒子の径より小さく設定される。スキン層 3 1 は、基質層 3 2 の外表面に薄いファインセラミックスやファイン金属をコーティングし焼成する（金属をコーティングする場合は腐食後に孔径が適切な範囲になるように腐食前の孔形状を調整する）こと等によっても生成することができる。

なお、中空膜管 3 0 は、上記のように明確に区分される複数の層から形成する必要は必ずしもなく、外層から内層に空隙の大きさに傾斜機能を持たせた構

造（空隙の大きさが順次変化する（外層側の方が小さい）構造）となっていて  
もよい。この場合も、最外周の細孔の大きさは、 $0.45\mu\text{m}$ 以下であることが望ましい。

なおこの場合、中空膜管30は、金属、合金ないし複合材料で作った原型中空膜を円筒形状ないしプリーツ形状に加工し中空膜管にした後、高温大気ないし水蒸気を含む大気中で腐食酸化させ最外表面の孔径を所定の大きさに調整することによっても形成することができる。

また、中空膜管の外周面および／または内周面にストレーナーを設けることも好ましい。このようにすれば、中空膜管30の基質層32に微少な破損が生じた場合、この破損物質が流出することを防止することができ、またろ過剤を中空膜管30の外表面に安定して保持することができる。

再度図5Aを参照する。高温水浄化装置40は容器40Aを有しており、容器40Aの上部の一側には取水口42が、他側には逆洗水注入口48が設けられている。容器40Aの底部には、ドレン水口47が設けられている。また、容器40Aの下部には給水口41が設けられている。なお、給水口41には給水ライン（例えば給水管）41Aを介して汚染度の高い水が供給され、取水口42からはこの高温水浄化装置40により浄化された水が排水ライン（例えば排水管）42Aを介して排出されるようになっている。給水ライン41Aと排水ライン42Aとは、プリコートポンプ（例えばミキシングポンプ）49Bが介装されたバイパスライン49Aに接続されている。プリコートポンプ49Bには、後に詳述するろ過剤を容器40Aに送り込むためのろ過剤供給源49Cが接続されている。

容器40A内の取水口42および逆洗水注入口48より低い位置に、水平方向に延びる上部支持板44が設けられている。上部支持板44には複数の穴が形成されており、各穴に中空膜管30の上端が差し込まれるようになっている。なお、容器40Aの上部支持板44の上側の空間と下側の空間は上部支持板44により完全に仕切られており、前記上側の空間と下側の空間との間の水の移動は中空膜管30を介してのみ可能となっている。

容器40A内の給水口41より低くかつドレン水口47より高い位置に、水

平方向に延びる下部支持板43が設けられている。下部支持板43には複数の穴が形成されている。下部支持板43は穴の開いていない部分で、中空膜管30の下端を支持しており、下部支持板43は中空膜管30の下端を閉塞している。従って、容器40Aの下部支持板43の上側の空間と下側の空間との間の水の移動は下部支持板43の穴を介してのみ可能となっている。

なお、図5Aでは、上部支持板44および下部支持板43とが容器40A内に固定されおり、中空膜管30が上部中空膜管支持板44と下部中空膜管支持板43との間に保持される構造になっているが、上部支持板44、下部支持板43および中空膜管30を一体化してカートリッジタイプにし、一括交換ができる構造にしてもよい。なお、高温水浄化装置40の容器40Aの頭部を着脱可能な構造、例えばフランジ構造にしておけば交換が容易である。なお、このようなフランジ構造を採った場合には、中空膜管30のみを交換することも可能である。

次に、作用について説明する。

まず、ろ過剤供給源49Cからバイパスライン49Aにろ過剤を送り込み、プリコートポンプ49Bによりバイパスライン49A中の水と混合する。この混合水を給水口41から容器40A内に送り込み、取水口42から取り出し、バイパスライン49Aに戻すように循環させる。この過程で中空膜管30を通過できないろ過剤が中空膜管30の表面にトラップされ、これにより図5Bに示すように中空膜管30の表面にろ過剤プリコート層34が形成される。

ここで用いられるろ過剤に少なくとも要求されることは、高温水条件下で安定であることと、かつイオン交換性能を有していることである。従って、ろ過剤としては、ヘマタイト( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、マグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )およびニッケルフェライト( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ )などのフェライト酸化物、並びに $\text{TiO}_2$ および $\text{ZrO}_2$ 酸化物を用いることが好ましい。特に、 $\text{TiO}_2$ については、第1の実施形態で説明したように、チェレンコフ光による光触媒反応による有機物分解効果も期待できる。

なお、上述したような酸化物を形成する主成分がFe、Ni、Ti、Zr等の純金属、これら金属の合金(例えばステンレス鋼)、またはこれら金属(純

金属若しくは合金)を含む複合材料をろ過剤として用いることも可能である。

なお、中空膜管30のスキン層の孔径を0.45 $\mu$ m以上に設定したことを考慮すると、ろ過剤が中空膜管30の細孔を閉塞させないようにには、ろ過剤の粒径は1 $\mu$ m以上とすることが好ましい。

なお、ろ過剤粒子としては、イオン交換性能の確保および差圧上昇を抑制するうえで、比表面積が大きく、空隙率の大きいろ過剤が望ましい。

なお、粒径の大きなセラミックスを作ることは困難であるため、中空膜管30の微細孔径以上の物質であれば或程度ろ過剤を容器40A内にとどめることができるということを考慮すると、1 $\mu$ m程度の大きいろ過剤は、比表面積が大きく、空隙率の大きい(ポラスな)微粉体で構成しても良い。このようなろ過剤粒子は、1 $\mu$ m以下の粒径の微細な粒子を焼結することにより得ることができ、経済的にも有利である。

ろ過剤プリコート層34が形成されたら、バイパスライン49Aと給水ライン41Aおよび排水ライン42Aとの連通を断ち、給水ライン41Aを介して給水口41から容器40A内に浄化対象となる汚染水を導入する。汚染水に含まれる放射性物質により汚染された粒子および放射性イオンは、ろ過剤プリコート層34にトラップされ、放射能の少ない水が中空膜管30内に侵入する。中空膜管30のスキン層31および基質層32を通過した水は、中空膜管30の中央部を貫通する空洞33を通過し、上部支持板44の上側の空間すなわち集水室45に入る。集水室45内の水は、取水口42および排水ライン42Aを介して容器40Aから排出される。

ろ過剤プリコート層34が汚染されたら、逆洗を行う。逆洗を行う場合には、給水口41および取水口42を弁で閉じ、逆洗水注水口48より注水する。すると逆洗水は、中空膜管30の空洞33、スキン層31および基質層32を順次通過し、ろ過剤プリコート層34とともに中空膜管30付着した腐食生成物を剥離させながら、中空膜管30の外側に流出する。ろ過剤および腐食生成物により混濁した逆洗水は、中空膜管30同士の隙間および下部支持板43の穴を順次経て、下部支持板43の下側の空間すなわちドレン水室46に集められ、ドレン水口47より系外に排出できる。なお、この場合、逆洗水に有機酸

をまぜれば、中空膜管 30 の除染および洗浄も可能となる。

なお、上記の説明ではろ過剤が中空膜管 30 の外表面にプリコートされている前提で説明を行ったが、ろ過剤は必ずしも中空膜管 30 の外表面にプリコートされている必要はなく、高温水浄化装置 40 の容器 40 A 内に攪拌された状態で浮遊していれば十分である。なお、この場合の容器 40 A 内での水の上昇速度は、ろ過剤のストークス径に応じた沈降速度より大きければよい。

なお、上述したような形式の高温フィルターは、粒子状の腐食生成物の捕捉による差圧上昇の面では低温フィルターより有利であるが、高温で使用できるイオン交換速度の速い物質がないためイオン交換の点では大幅に不利となる。従って、イオン交換性能を高めるためには、イオン交換物質の量を多くするか表面積を大きくする必要がある。微細な粒子の捕捉しかつ差圧を小さく保つトレードオフの関連を工夫する必要がある。従って、ろ過面積を大きくするとともに差圧上昇を防止する必要がある。

高温で使用できる無機材料では一般にイオンの蒸気からの輸送速度に比べて材料表面での捕捉速度は小さい。この点が、イオン交換樹脂の低温除去装置と無機イオン交換体の高温水浄化装置とで大きく異なっている。すなわち、イオンの捕捉反応は、流体から材料表面へのイオンの輸送速度ではなく、材料表面でのイオン取り込み反応に律速している。

ステンレス鋼製のろ過剤を例にとり、イオン取り込み速度について説明する。1100 Mwe 級 BWR では原子炉圧力容器および原子炉圧力容器内の装置にステンレス鋼が使われており、これらの表面にもフェライトが形成される。通常 5000 m<sup>2</sup> の表面積をもつ炉心外表面は、炉水の Ni イオン濃度が高い場合で約 1 % 相当容量、炉水の Ni イオン濃度が低い場合で約 4 % 相当容量の低温のイオン交換樹脂による炉水浄化装置に相当 (1 EFPY 時点での値で、時間に対しては除去速度が時間  $t^{-1/2}$  に比例する) する。従って、ステンレス鋼で中空膜管およびろ過剤を作成した場合、炉水の Ni イオン濃度が高い場合で 8 % 容量の場合は 40000 m<sup>2</sup> が必要となる。100  $\mu$ m の球形では 15 m<sup>3</sup> と算出される。10  $\mu$ m の球形では、1.5 m<sup>3</sup> となる。1  $\mu$ m の球形では 0.15 m<sup>3</sup> である。炉水の Ni イオン濃度が低い場合は、100  $\mu$ m の球形では 4 m

<sup>3</sup>、 $10\mu\text{m}$ の球形では $0.4\text{m}^3$ 、 $1\mu\text{m}$ の球形ではわずか $0.04\text{m}^3$ で充分であることがわかる。

図6には、図5Aに示す実施形態の変形例を示す。図6の例では、中空膜管30の外側にストレーナー49Aが設けられており、中空膜管30の外表面とストレーナーとの間に例えば粒径 $1\mu\text{m}$ のろ過剤粒子50が保持されており、ストレーナー・ろ過剤一体型中空膜管49が構成されている。なお、ろ過剤粒子50の材料としては、ろ過剤ブリコート層34をろ過剤の材料と同一または類似のものが用いられる。

また、図6に示す例の場合も、上部中空膜管支持板44と下部支持板43とが高温水浄化装置40の容器40Aに固定され、中空膜管30が上部支持板44と下部中空膜管支持板43との間に保持される構造になっているが、これらを一体化しカートリッジタイプにすることもでき、このようにすれば一括交換が容易になる。この場合も、高温水浄化装置40の容器40Aの頭部を着脱可能な構造、例えばフランジ構造にしておけば、中空膜管30の交換も可能である。

図6に示す変形例に係る高温水浄化装置は、高温水が蒸気の状態であっても液体の状態であっても使用可能である。

### [第3の実施形態]

次に、図7を参照して第3の実施形態について説明する。図6に示す高温水浄化装置は、蒸気状態の高温水を浄化する用途に適している。なお、図7に示す高温水浄化装置において、図5Aに示す高温水浄化装置の部材と同一または類似の機能を果たす部材については同一符号を付し、重複説明は省略する。

図7に示すように、高温水浄化装置40の容器40Aの上部の側には取水口42が、他側には逆洗水注入口48が設けられている。容器40Aの底部には、給水口41が設けられている。また、容器40Aの下部にはドレン水口47が設けられている。なお、給水口41には給水ライン（例えば給水管）41Aを介して汚染度の高い蒸気水が供給され、取水口42からはこの高温水浄化装置40により浄化された水が排水ライン（例えば排水管）42Aを介して排

出されるようになっている。

容器40A内の取水口42および逆洗水注入口48より低い位置に、水平方向に延びる上部支持板44が設けられている。上部支持板44には複数の穴が形成されており、各穴に中空膜管30の上端が差し込まれている。その一方で、上部支持板44は穴の開いていない部分で、中空の給水ストレーナー管51の上端を支持しており、上部支持板44は給水ストレーナー管51の下端を閉塞している。なお、容器40Aの上部支持板44の上側の空間と下側の空間は上部支持板44により完全に仕切られており、前記上側の空間と下側の空間との間の水の移動は中空膜管30を介してのみ可能となっている。

容器40A内のドレン水口47より低くかつ給水口41より高い位置に、水平方向に延びる下部支持板43が設けられている。下部支持板43には複数の孔が形成されており、各孔に給水ストレーナー管51の下端が差し込まれている。その一方で、下部支持板43は孔の開いていない部分で、中空膜管30の下端を支持しており、下部支持板43は中空膜管30の下端を閉塞している。従って、容器40Aの下部支持板43の上側の空間と下側の空間との間の水の移動は給水ストレーナー管51を介してのみ可能となっている。

本例では、中空膜管30は六方格子状に配列されており、給水ストレーナー管51は、六方格子の中心点に配置されている。従って、中空膜管30の本数と給水ストレーナー管51の本数の比は、2:1である。

上部支持板44と下部支持板43との間の空間は粒状のろ過剤により充填されている。

なお、中空膜管30およびろ過剤は、第2の実施形態で説明した中空膜管30およびろ過剤と同一または類似のものを用いることができる。

取水口41から下部支持板43の下方の空間に高温蒸気が導入されると、蒸気はそこから給水ストレーナー管51、ろ過剤、中空膜管30を順次経て、集水室45に入り、取水口42から容器40A外に排出される。この過程において、高温蒸気はろ過剤および中空膜管30により浄化される。

次に、本実施形態に係る高温水浄化装置の具体的な仕様について説明する。容器40Aは円筒形状でありその内に外形寸法を25.4mm、長さを5080

mmの中空膜管30（一本当たりのろ過面積： $0.405\text{ m}^2$ ）が六方格子状に平行に配列されている。一方、中空膜管30と同一寸法形状の給水ストレーナー管51は中空膜管30の六方格子点の中心点に配置されている。フィルター（中空膜管30および給水ストレーナー管51）の充填率を75%とすると、 $1\text{ m}^2$ あたり1500本のフィルターを充填できる。給水ストレーナー管51と中空膜管30との間のろ過層（ろ過剤が充填される領域）の最短間隔は2.4mmである。原子炉の内径は1100Mwe級BWRで6.4mでありこのときの面積は $32\text{ m}^2$ （体積 $163\text{ m}^3$ ）であることより、48000本以上のフィルターを充填できる。このうちの2/3の32000本が中空膜管30（総ろ過面積 $12960\text{ m}^2$ ）である。蒸気流量は $6400\text{ Ton/hr}$ であることより、蒸気の比重 $0.036\text{ Ton/m}^3$ を考慮すると、蒸気のろ過面での面速度は $3.8\text{ mm/s}$ である。

ステンレス鋼製の球形ろ過剤が単純立方結晶配列（空隙率：48%、最小空隙間隔：ろ過剤径の0.41倍）で付着している場合の285℃の蒸気中のCo-60イオンをDFの算定式(1)式で $DF=10^4$ で除去できるろ過層について考察する。ろ過剤の直径を $1\text{ }\mu\text{m}$ とすると、空隙の等価円筒半径は $0.39\text{ }\mu\text{m}$ である。空隙率は48%であることより、空隙内の速度は $7.9\text{ mm/s}$ である。従って、単位長さ（1mm）あたりを通過する時間は0.13s程度である。ここで、水通路を円筒近似したが、実際はろ過剤は球であるため表面積は円筒流路の1.28倍である。

ここで、ろ過剤表面でのCo-60の化学反応は蒸気と高温水とで同様と推定すると、一回の流体の通過でイオンの除去されるろ過剤の厚みについて計算する。炉水のNiイオン濃度が高い場合は、 $5000\text{ m}^2$ で $60\text{ Ton/hr}$ の除去速度であるため、高温水の比重 $0.74\text{ Ton/m}^3$ で補正し高温水の体積浄化速度を求めると $81\text{ m}^3/\text{hr}$ に相当する。 $0.0162\text{ m/hr}$ 、すなわち $4.5\text{ }\mu\text{m/s}$ の除去速度である。ろ過層の空隙円筒長さL（mm）でのCo-60のDFは(1)式であたえられる。

$$DF = e^{4.5 \times 2 \times 1.28 / 0.39 \times 0.13L} \dots (1)$$

給水ストレーナー管51と中空膜管30との間の距離は2.4mmのろ過層



があれば $10^4$ 程度のDFが得られる。この場合、ろ過剤の充填体積は $4\text{ l m}^3$ となる。

次に、 $1\text{ }\mu\text{m}$ の球形粒子の $2.4\text{ mm}$ のろ過層の水頭長 $L$ を計算する。計算にあたっては、「ウェパー水質制御の物理化学プロセス（朝倉書店）p.126」を参照した。（2）式より、約 $200\text{ m}$ の水頭ロスであることがわかる。

$$h = J L v / g (1 - \varepsilon)^2 / \varepsilon^3 v (\sigma / d)^2 \dots (2)$$

ここで（2）式において、

J : 実験定数	約6
L : 濾過層の厚み	$2.4\text{ mm}$
$\nu$ : 動粘性係数	$0.56 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
g : 重力加速度	$9.8\text{ m/s}^2$
$\varepsilon$ : 空隙率	0.48
$\sigma$ : 形状係数	約6
v : 空筒速度	$0.0038\text{ m/s}$
d : ろ過剤の直径	$1\text{ }\mu\text{m}$

である。

なお、炉水のNiイオン濃度が低い場合は、ろ過剤の充填体積は $10\text{ m}^3$ 強で水頭ロスは約 $50\text{ m}$ となる。

いずれの場合でも、 $285^\circ\text{C}$ のBWRにおいて、原子炉圧力容器内にDF $10^4$ の高温浄化装置を設置するのは難しい。しかしながら、 $650^\circ\text{C}$ の超臨界水においては温度が高くなるのでろ過剤との反応速度は早くなり、 $285^\circ\text{C}$ に比べて $100$ 倍程度高まる。従って、ろ過剤は $24\text{ }\mu\text{m}$ 程度（ろ過剤の充填体積は $0.41\text{ m}^3$ ）で充分であり、水頭ロスは約 $2\text{ m}$ であり充分目的を達成できる。この場合、ろ過剤の充填量を $10$ 倍（ろ過剤の充填体積は $4.1\text{ m}^3$ で $1\text{ }\mu\text{m}$ の粒子径）にすることもできる。この場合、差圧は（2）式に従うので $1/10$ にすることができる。このように、差圧上昇と捕捉容量との両立が達成される。

以上説明した第2乃至第3の実施形態に係る高温水浄化装置を、図1の原子炉圧力容器内9、または原子炉圧力容器内9からタービン入口の蒸気バルブ1

の間に適宜設置することにより、放射性物質を効果的に分離・除去することができ、蒸気系への放射能の移行を低減することができる。

高温水浄化装置は、新設のプラントにおいては設計上の余裕度が高いため、新規な装置として組み込むことができる。また、既設のプラントにおいては、新設プラントのように全く新規の浄化装置を組み込むことはスペース上の理由等から困難または不可能な場合が多いが、このような場合には、例えば第2の実施形態のように既存のドライヤーの波板を改良してドライヤーに高温水浄化装置としての機能を付与することにより対応することも可能である。

第2または第3の実施形態に係る高温水浄化装置は、圧力容器内のみならず、例えば原子炉圧力容器9からタービン入口の蒸気バルブ1の間に設置することもできる。なお、通常、蒸気・タービン系に異常が発生した場合に備えて原子炉系と蒸気・タービン系とを連結する蒸気配管系11には蒸気隔離弁（図示せず）が設けられているため、高温水浄化装置は、蒸気隔離弁より下流側であってかつタービン入口の蒸気バルブ1の上流側に設置するのが安全性が高い。なお、原子炉圧力容器内9からタービン入口の蒸気バルブ1の間に高温水浄化装置を設置した場合、高温浄化装置の異常時に高温水浄化装置をバイパスする配管を設けても良い。

本実施形態に係る高温水浄化装置は、現行のイオン交換樹脂を用いた炉水浄化装置に比べて、熱ロスが無いという点で有利である。また、高温条件下では、下表1に示すごとく水の粘性抵抗が著しく低下するため、同一形状の低温フィルターに比べて大幅に初期差圧を下げることができる。

表1 水、蒸気の粘性係数

	水	飽和水	飽和蒸気	超臨界水
温度 (°C)	25	285	285	650
圧力 (Mpa)	0.1	7.0	7.0	25
密度 (kg/m³)	1000	740	36	59
粘性係数 (μPas)	891	90	20	39

また、特に、本実施形態に係る高温水浄化装置では、高温水存在下で安定なイオン交換物質を用いているため、寿命も長い。なお、現行のイオン交換樹脂を用いた炉水浄化装置の容量は、低温型で給水流量の2%である。例えば8%容量相当の高温浄化装置を付加することにより炉水放射能濃度を現行の1/5程度にでき蒸気系への移行も炉水放射能濃度に比例して低減することができる。

なお、高温水浄化装置の差圧上昇を抑制するためには、給水からの鉄持ち込み量を0.1ppb以下とすることが好ましい。高温水浄化装置の差圧上昇は、粒子状の腐食生成物が捕捉されることに起因している。この粒子状の腐食生成物は鉄が主成分であり、その大部分は復水浄化系をリークしたものである。復水浄化系に中空糸フィルターを設置することにより給水からの鉄持ち込み量を0.1ppb以下、平均で0.02ppb程度にできるということが過去の運転実績から確認されている。

この量は、中空糸フィルターを設置していないプラントの給水からの鉄持ち込み量の1/10以下である。なお、中空糸フィルターを設置していないプラントにおいては高温浄化装置を試験的に運用してみたところ、高温浄化装置のフィルタは数年の寿命であった。このことを考慮すると、現行仕様の高温フィルターを使用した場合でも、高温浄化装置への給水からの鉄持ち込み量を所定値以下に抑制することによりプラントの寿命に近い年数にわたり運転することが可能となることが推察される。

なお、これまでの説明では、放射性物質を捕捉することによって蒸気系への放射性物質の移行を低減する手法について説明してきたが、放射性物質を含む蒸気の発生自体を低減することも効果的である。

そのためには、ヘッドスプレー6に使用する水を、現行の炉水浄化装置5の出口水から、図1に示す復水浄化装置7または復水貯蔵タンク8の出口水に変更することが有効である。このようにすれば、復水浄化装置7または復水貯蔵タンク8の出口水は、炉水浄化装置5の出口水より放射能含有量が少ないため、ヘッドスプレー時に発生する蒸気に含まれる放射能を低減することができる。最近のヘッドスプレーを用いて原子炉停止時に早く温度を下げる運転がなさ

れている現状を鑑みればこのことによる効果は大きい。

なお、ヘッドスプレーのスプレー水が飛散して温度の高い圧力容器に直接掛からないようにスプレーの孔の向きを炉内構造物の方向に向けるか、またはスプレーの孔と圧力容器内面との間に遮蔽となるカバーを配設し、このカバーによりスプレーする領域を制限したり、ノズルまたは超音波などにより噴霧する液滴径を小さくし、停止後の熱合発生に伴う蒸気発生量に応じてスプレー水量を制御することも放射性物質を含む蒸気量を低減する上で好適である。この場合、例えば、ヘッドスプレー6を複数のノズル孔（直径1 mm以下）を有するシャワーヘッド状に形成し、シャワーヘッドにおけるノズル孔の配置面積をほぼ400 cm<sup>2</sup>とし、ドライヤー全体にちょうどスプレー水がかかるように（ドライヤーに衝突しない水がないように）水をスプレーすることが好適である。

現行システムでは圧力容器の温度に近い炉水浄化系出口水を使用しており、ヘッドスプレーのスプレー水が飛散し圧力容器に直接掛かった場合でも熱応力が比較的軽減される設計になっている。しかしながら、炉水の温度降下に比べて圧力容器の温度降下は遅く温度差が次第に大きくなり、ヘッドスプレーの広がりを押さえ液滴を小さくし停止後の蒸気発生量に会わせて低温の蒸気になり圧力容器に接触し温度を均等に下げる方法に特徴がある。本方法の採用により、より安全に効率よく低下させることができる。